

Flotación en columna como técnica de beneficio para minerales finos

La flotación en columna es una técnica de beneficio de minerales finos que se ha desarrollado en los últimos años. Esta técnica se basa en la creación de una columna de agua en la que se introduce el mineral a beneficiar. El agua se mueve hacia abajo y el mineral se levanta debido a la acción de la espuma que se genera en la superficie. El mineral se recoge en la parte superior de la columna y el agua se recoge en la parte inferior.

La flotación en columna es una técnica de beneficio de minerales finos que se ha desarrollado en los últimos años. Esta técnica se basa en la creación de una columna de agua en la que se introduce el mineral a beneficiar. El agua se mueve hacia abajo y el mineral se levanta debido a la acción de la espuma que se genera en la superficie. El mineral se recoge en la parte superior de la columna y el agua se recoge en la parte inferior.

El objetivo de este artículo es proporcionar una visión general de la información más importante relacionada con el proceso de flotación en columna. La información se divide en tres secciones: una introducción, una descripción del proceso y una conclusión.

La introducción describe el objetivo del artículo y la importancia de la flotación en columna. La descripción del proceso describe los pasos del proceso de flotación en columna. La conclusión resume los puntos principales del artículo.

La flotación en columna es una técnica de beneficio de minerales finos que se ha desarrollado en los últimos años. Esta técnica se basa en la creación de una columna de agua en la que se introduce el mineral a beneficiar. El agua se mueve hacia abajo y el mineral se levanta debido a la acción de la espuma que se genera en la superficie. El mineral se recoge en la parte superior de la columna y el agua se recoge en la parte inferior.

La flotación en columna es una técnica de beneficio de minerales finos que se ha desarrollado en los últimos años. Esta técnica se basa en la creación de una columna de agua en la que se introduce el mineral a beneficiar. El agua se mueve hacia abajo y el mineral se levanta debido a la acción de la espuma que se genera en la superficie. El mineral se recoge en la parte superior de la columna y el agua se recoge en la parte inferior.

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Grupo de Investigación en Nuevos Materiales
y sus Tecnologías de Fabricación
Nuevmat@tunja.uptc.edu.co

* Estudiante de Maestría – UPTC
** Director Grupo de Investigación – UPTC
*** Auxiliar de investigación – U. de Antioquía

Resumen

El propósito de este artículo es presentar una recopilación bibliográfica de la flotación en columna y sus avances, como una alternativa para el beneficio de minerales del tamaño fino y ultrafino. Se presentan, además, las variables más influyentes que intervienen en el proceso y su importancia.

Abstract

This article aims at showing a bibliographic collection upon column floating and its progresses, as an alternative to profit fine size and also ultra-fine minerals. Additionally, this article treats the most influencing variables intervening throughout the process and their importance as well.

Palabras clave: flotación en columna, minerales ultrafinos, técnicas de beneficio.

Key word: column floating, ultra-fine minerals, techniques of benefit.

1. Introducción

Desde la invención de los procesos de flotación y su introducción exitosa en plantas de procesamiento de minerales, ha sido de gran interés el entender los mecanismos y variables que tienen lugar durante la operación. Se ha encontrado que la flotación en columna tiene mejor desempeño que las celdas de flotación convencional, particularmente con partículas finas.

La flotación en columna es una técnica atractiva para minerales complejos que presentan problemas de selectividad, elevando sustancialmente el grado del concentrado y una mayor recuperación, con una sola etapa de limpieza. Como todo proceso, solamente después de que todas las variables involucradas son examinadas, se puede conseguir un buen entendimiento del mismo.

El objeto de este artículo es construir en forma resumida la información más importante involucrada en el proceso de flotación en columna, referente a sus generalidades, variables más influyentes en el proceso y algunos de los avances alcanzados hasta la fecha.

2. Generalidades

Frecuentemente, es necesario en el procesamiento de mezclas de partículas finas, que ciertos componentes de la mezcla sean separados físicamente de otros. Con el objeto de llevar a cabo dicha separación sólido-sólido, éstas deben tener diferencias suficientes en algunas de las propiedades físicas o químicas¹, tales como: La densidad, susceptibilidad magnética, conductividad eléctrica, diferencias en fricción, radioactividad o color y

propiedades superficiales. De acuerdo con estas propiedades, los métodos de separación en el procesamiento de minerales se clasifican en: Gravimétricos, magnéticos, electrostáticos y fisicoquímicos (fig. 1) en los que es muy importante el grado de liberación.

El método más común es la concentración gravimétrica para partículas gruesas (con tamaños que caen en el rango de $10^3 - 10^5$ mm). El tamaño de partículas que pueden separarse usando métodos magnéticos y electrostáticos caen en el rango de $10^2 - 10^3$ mm. En los métodos de flotación, el tamaño de partícula puede estar en el rango de $10^1 - 10^2$ mm².

La flotación espumante es un proceso de concentración fisico-químico para minerales de tamaño fino que ha sido ampliamente estudiado en el área minero-metalúrgica y se encuentra totalmente incorporado en la mayoría de los procesos extractivos^{2,3}; se basa en la hidrofobicidad de las partículas, esta última referida a la tendencia que tiene la superficie de la partícula a no asociarse estrechamente con el agua, ni a formar hidruros sobre la misma. Las partículas que repelen el agua de su superficie tienen la tendencia a preferir asociarse con materiales hidrocarbonados o aceitosos².

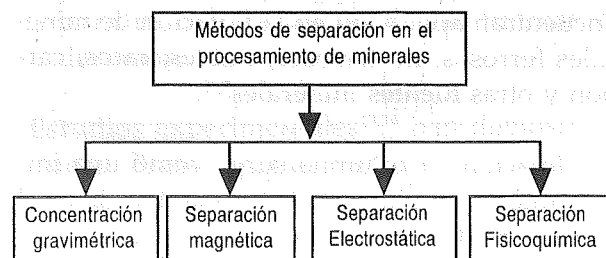


Figura 1. Clasificación de los métodos de separación en el procesamiento de minerales.

El tratamiento de partículas finas requiere de mucha atención pues su recuperación por flotación puede ser mucho más baja que para el mismo material en tamaños grandes⁴.

En el procesamiento de minerales pueden distinguirse tres clases de minerales finos²:

- a. Minerales de arcilla que ocurren naturalmente, tales como la caolinita, illita, montmorillonita, los cuales están compuestos por partículas muy pequeñas (principalmente por debajo de 2 mm).
- b. Los finos producidos durante la trituración y molienda de minerales en operaciones de beneficio.
- c. Los residuos de la lixiviación de minerales triturados en procesos hidrometalúrgicos. Tales lodos consisten parcialmente de partículas minerales insolubles y parcialmente de precipitados (productos de reacciones químicas).

Los desarrollos en tecnología y técnicas de flotación están asociados estrechamente a la mejora en las máquinas de flotación. Para reforzar los procesos de flotación, se requiere crear máquinas de flotación altamente productivas.

Los requerimientos actuales en el campo de aireación de la pulpa y las teorías de mineralización de burbujas, imponen el diseño de máquinas de flotación neumática del tipo columna, las cuales presentan mejor desempeño que las celdas de flotación convencionales, particularmente con partículas finas; además, encuentran aplicación en la flotación de minerales ferrosos, no ferrosos, nobles, raros, carbón y otras fuentes minerales^{5, 6}.

La flotación en columna surge como una importante mejora durante la última década en el campo de la concentración por flotación.

3. Flotación en columna

3.1 Antecedentes

Esta técnica fue patentada a principios de 1960 por Boutin y Tremblay (patentes canadienses 680,576 y 694,547). Las primeras descripciones de la columna y las pruebas de trabajo fueron dados por Wheeler (1996) y Boutin y Wheeler (1967). Este diseño algunas veces es llamado columna "Canadiense", dado el número de variaciones, ésta puede llamarse ahora columna "convencional"⁷.

Se han realizado investigaciones para la flotación de minerales de cobre, molibdeno y en la década de los 90 en Chile, se incorporaron columnas para la flotación de estos minerales⁸. Recientemente en países como Estados Unidos, Australia y algunos de Sudamérica, se han realizado investigaciones y aplicaciones comerciales sobre este nuevo proceso, principalmente en sulfuros de Cobre-Molibdeno, óxidos de hierro, carbón y grafito.

El campo básico de investigación usando dispositivos en columna ha desarrollado una estrategia que puede ser implementada en la recuperación de minerales de intervalo de tamaño fino⁵ y ultrafino, combinando elementos de fisicoquímica de superficies tradicionales, con elementos de la mecánica de fluidos, relacionados principalmente con la disminución de la turbulencia en las celdas de flotación. Es una nueva técnica que emplea el principio del flujo a contracorriente entre burbujas de aire y la pulpa⁹, aquí las partículas que descienden de la parte superior (alimentación), colisionan con las burbujas que ascienden de la parte inferior (distribuidores de burbujas). La recuperación bajo este sistema se debe a que las burbujas generadas son más finas (500 a 1.000 micrómetros) que las que se obtienen en la celda convencional (3.000 a 5.000 micrómetros).

Es importante señalar que además de la geometría (relación altura/ diámetro), existen dos características adicionales que distinguen la columna de otros dispositivos usados en flotación: El sistema de generación de burbujas y el uso de una ducha (wash water)^{6,7}. En la flotación convencional, se usa agitación mecánica con un gasto extra de energía, además, las burbujas se desplazan en la misma dirección y velocidad que las partículas, por lo que éstas no se unen con facilidad¹⁰. Los mismos principios de fisicoquímica de superficie que se aplican a la flotación en celdas convencionales son válidos para la flotación en columna, siendo la cinética de flotación mucho más rápida en esta última¹¹.

Las efectividad del trabajo con máquinas de flotación depende de las condiciones en la dispersión de aire⁵. El método de generación de burbujas es una de las principales diferencias entre la columna de flotación y las celdas convencionales puesto que este tipo de flotación no utiliza agitación mecánica para suspender las partículas y dispersar el aire, haciéndolas más eficientes en energía y menos costosas de mantener.

Existen otras ventajas de la flotación en columna frente a las celdas mecánicas y neumomecánicas, entre las cuales se destacan¹²:

- Mejor recuperación que las celdas mecánicas.
- Instalación rentable.
- Menor consumo de energía para la generación de burbujas (no requiere de "impellers").
- Menor ocupación de espacio.

El movimiento de la partícula y de la burbuja es un factor importante, el cual determina la velocidad de la flotación y el consumo de energía del proceso. Las fuerzas inerciales que destruyen el complejo partícula-burbuja en la columna es insignificante. Esto está asociado a

la ausencia de un dispositivo de agitación y un flujo de pulpa a baja turbulencia⁵.

El incremento de la actividad de la flotación por burbujas de aire está asociada al incremento de su tiempo de acondicionamiento, es decir, el intervalo entre el momento de la formación y la mineralización de la burbuja. En consecuencia, de la altura de la columna, el mantenimiento y duración de las burbujas de aire en ésta no debe ser mayor de 20 s.

3.2 Aspectos fundamentales de los procesos de flotación con microburbujas:

- **Propiedades interfaciales de las microburbujas:** Las propiedades interfaciales de las microburbujas que son de interés en la flotación son la distribución de agentes de superficie activa sobre la superficie de la burbuja, la densidad de carga y el potencial eléctrico en la interfase burbuja/solución porque se ha demostrado que estas propiedades afectan los mecanismos de adhesión de las burbujas a las superficies^{13,14}.
- **Adhesión burbuja-partícula:** La adhesión de la partícula a la burbuja de gas en un sistema de flotación, es el resultado de una serie de etapas consecutivas, cada una de las cuales está determinada por las diferentes propiedades del sistema. Es aceptado generalmente que para que una partícula pueda ser colectada y flotada por una burbuja, debe haber: a) una colisión entre ellas, b) Una adhesión donde la partícula y la burbuja forman un agregado y c) el agregado partícula-burbuja debe ser bastante estable para resistir la acción de las fuerzas de desunión.

Estudios experimentales^{13,14} han demostrado que se logran varias ventajas al reducir el tamaño de las burbujas. Para un tamaño de partícula constante, el uso de burbujas podría incrementar la probabilidad de colisión, la probabilidad de adhesión y también la rata de flotación.

- **Colección de partículas por las microburbujas:** La colisión burbuja-partícula está determinada básicamente por la hidrodinámica del flujo alrededor de la burbuja que es una función de los tamaños de las burbujas y de las partículas.

3.3 Zonas de la celda de flotación en columna

Según investigaciones recientes^{2,6,9,15}, las columnas de flotación tienen varias zonas diferentes a lo largo del eje vertical (Figura 2). Dos de esas zonas están separadas por una interfase visible que resulta de la acumulación de burbujas en la parte superior de la espuma.

3.3.1 Zona de colección o recuperación (Zona 2). Está localizada entre la interfase de espuma y los difusores. En esta zona ocurre el contacto partícula/burbuja y el material flotable proveniente de la alimentación fluye, el material que es devuelto después de ser rechazado en la zona de espuma (dropback) es colectado por las burbujas que van subiendo.

Una partícula mineral es colectada por una burbuja de gas por medio de uno de los dos siguientes procesos: a). Colisión partícula-burbuja seguido de adhesión debida a la naturaleza hidrofóbica de la superficie del mineral o b). Entrada de la partícula dentro de la capa límite y debilitamiento de la burbuja. Una característica clave de la columna de flotación es que la partícula recuperada por este proceso puede ser virtualmente eliminada. La recuperación de material es dependiente del tiempo de residencia y características de mezcla.

3.3.1.1 Tiempo de residencia¹⁵. El tiempo de residencia en la zona de colección esta estimado para una columna de sección redonda mediante la siguiente ecuación:

$$\tau_{sl}(\text{min}) = \frac{15\pi d_c^2 (H_c - H_{spa} - H_f)(1 - \rho_{col} / \rho_{sl})}{V_{tal}}$$

H_{spa} = Nivel (ubicación) del sparger (m)
 H_f = Nivel de la interfase (m)
 ρ_{col} = Densidad de la zona de colección (t/m^3)
 ρ_{sl} = Densidad de la slurry concentrada (t/m^3)
 V_{tal} = Rata de flujo volumétrico de colas (underflow) (m^3/hr)

donde:

τ_{sl} = Tiempo de residencia en la zona de colección (min)

d_c = Diámetro de la columna (m)

H_c = Altura total de la columna (m)

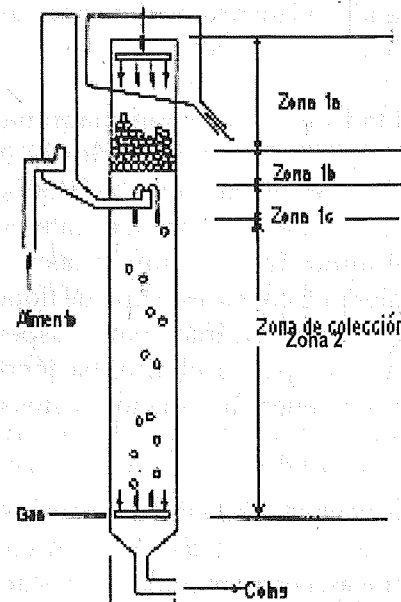


Figura 2. Zonas de la columna de flotación.

La ecuación tiene tres partes: Volumen de la columna, gas holdup y velocidad de la slurry.

3.3.2 Zona espumante o de limpieza: en general puede decirse que ésta se extiende desde la zona de colección o desde la interfase pulpa-espuma, hasta el borde de la columna. Acá se recogen las burbujas cargadas de mineral hidrófobo.

El agua de lavado estabiliza las burbujas y reduce la coalescencia. Como las burbujas

ascienden a la zona de espuma una cierta cantidad de coalescencia ocurre. Esto reduce el área superficial de la burbuja disponible y también disminuye el volumen de espacios entre las burbujas los cuales son ocupados por agua¹⁵.

Esta se divide en:

Zona de limpieza fase espuma (Zona 1a): Región que se extiende hacia arriba desde la interfase pulpa-espuma, hasta el rebalse de la columna.

La estabilidad de la espuma es mantenida mediante agua de lavado, la cual fluye hacia abajo a través de las películas que separan las burbujas, inhibiendo la coalescencia.

Zona de limpieza Interfase pulpa-espuma (Zona 1b): región de longitud arbitraria en la interfase pulpa-espuma ubicada sobre y por debajo de la interfase pulpa-espuma.

Zona de limpieza fase pulpa (Zona 1c): Región que se extiende hacia abajo desde la interfase pulpa-espuma hasta la tobera de inyección del material de alimentación.

3.4 Factores influyentes en la flotación columnar

3.4.1 Relación altura: diámetro¹⁶. El volumen de la celda de flotación está determinado principalmente por el tiempo de retención requerido y la rata volumétrica de alimentación. Claramente, una variedad de relaciones altura:diámetro (es decir, geometrías de la columna) pueden dar el mismo tiempo de retención, sin embargo, al variar la geometría, se ocasionan cambios que afectan el funcionamiento de la columna^{5,6,7,17}.

3.4.2 Gas Holdup. Cuando una columna de aire se introduce dentro de una columna de líquido (o slurry), éste sufre un desplazamiento. La fracción volumétrica desplazada es llamada "gas holdup" ϵ_g .

Se refiere a la fracción volumétrica (o porcentaje) ocupado por el gas en cualquier punto en la columna^{5,6,7,15}. Puede medirse de tres formas diferentes (figura 3):

- Midiendo el total de altura alcanzado por efecto del desplazamiento de aire.
- Por diferencia de presión
- Mediante el uso de sensores de conductividad.

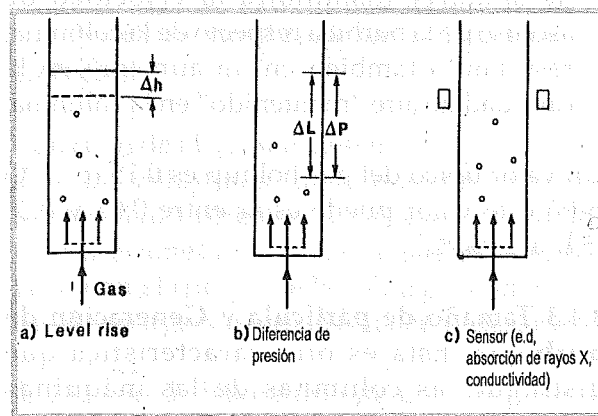


Figura 3. Métodos para medir el gas holdup.

La relación entre el ϵ_g y la velocidad del gas J_g (cm/s) define el régimen del flujo en la zona de colección (figura 4). La velocidad superficial del gas se define como la rata de flujo volumétrico del material (slurry) dividido en el área de la sección transversal de la columna expresada normalmente en cm/s. Esta variable permite la evaluación de las características de funcionamiento de la columna, independiente de su diámetro.

Este es un parámetro dependiente de otras variables tales como velocidad volumétrica de aire, tamaño de las burbujas, densidad de la slurry, carga de sólidos en las burbujas y velocidad de la slurry. El incremento en el gas holdup reduce el tiempo de residencia en la zona de colección. El gas holdup puede incrementarse debido a tres factores:

- Un incremento en el flujo de gas incrementará el número de burbujas presentes en la columna de modo que más burbujas están siendo generadas en un mismo periodo de tiempo.
- Una disminución en el tamaño de burbuja causado por la operación del sparger o dosificación del espumante causará que cada burbuja suba más lentamente en la slurry, además causa una cantidad incrementada de aire en la columna.
- Un incremento en la velocidad descendente de la slurry disminuirá la velocidad de ascenso de la burbuja respecto de la columna, resultando también en un aumento en la cantidad de aire "mantenido" en la columna.

Un valor típico del gas holdup es 0.15 (o 15%) pero este valor puede estar entre 0.05 y 0.25 (5% a 25%)¹⁵.

3.4.3 Tamaño de partícula y Generación de burbujas. Esta es otra característica que distingue las columnas de las máquinas convencionales⁷.

Tanto el tamaño promedio de las burbujas como la distribución de sus tamaños son importantes en la flotación en columna.

Ellos afectan la máxima rata de gas, la probabilidad de coleccionar partículas sobre la burbuja y la capacidad de arrastre de sólidos por el gas (C_g). Las burbujas usadas están típicamente entre 0.8 y 1.6 mm de diámetro, este diámetro depende de las condiciones de los reactivos, diseño del sparger y de la presión de operación¹⁵.

Existen dos métodos de generación dependiendo de la ubicación del sparger (burbujeador)^{7,15}:

- **Sparger internos:** el método más común de generación de burbujas es a través de spargers ubicados cerca de la base de la columna. Hay dos categorías: porosos (tal como

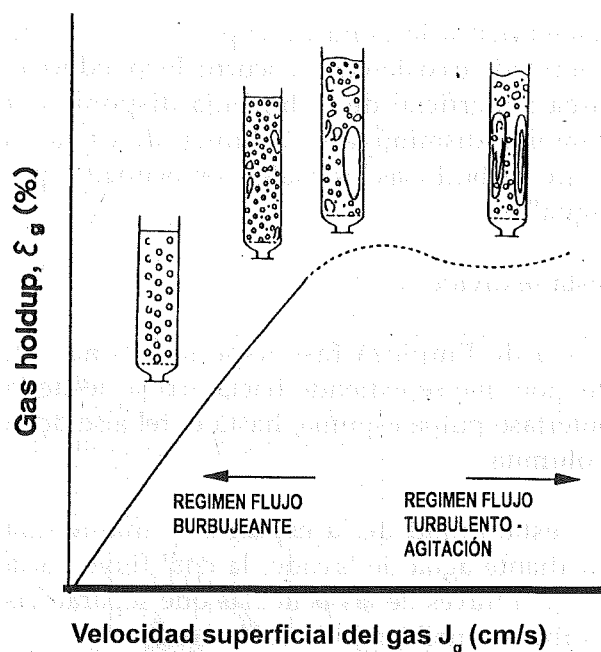


Figura 4. Relación general del Gas holdup como una función de la velocidad del gas.

vidrio sinterizado) y de boquilla simple o múltiple. Todos los spargers porosos exhiben un gas holdup similar, el cual es más alto que para los spargers multiboquillas.

- **Spargers externos:** un segundo método es ubicando el sparger fuera de la columna. Externo en este contexto significa que el gas y el líquido (o slurry) están en contacto fuera de la columna y la mezcla se dirige luego al fondo de la columna. Las ventajas de éstos, comparados con los internos, incluyen: Menor oportunidad de taponamiento con sólidos o precipitados y un control sobre el tamaño de las burbujas (mediante la manipulación del agua y el gas). Las principales desventajas tienen que ver con la entrada de agua extra por la parte inferior de la columna y que su operación es más complicada.

3.4.4 Bias. El término "bias" (bias superficial J_b) es usado para describir el flujo neto de agua (magnitud y dirección) a través de la zona de

limpieza (equivalente a la diferencia en el flujo de agua entre las colas y el alimento). Frecuentemente se calcula como la diferencia neta entre el flujo volumétrico de slurry en las colas y el flujo volumétrico de las ratas de alimentación de la slurry, dividida por el área de la sección transversal de la columna¹⁸. Para una limpieza eficiente, el bias debe ser normalmente mayor que cero en la dirección descendente (bias positivo), con el fin de garantizar que las partículas no deseables en el concentrado se dirijan a las colas.

3.4.5 Rata de aire. La máxima rata de aire que una columna es capaz de manejar está determinada por tres límites: (a) La rata de alimentación debe ser menor que la velocidad de subida de las burbujas, (b) La densidad de la zona de recolección debe ser más grande que la densidad de la zona de espuma y (c) La coalescencia de burbujas no debe formar "slugs" de aire.

- (a) La velocidad de la burbuja que sube depende del tamaño de la misma. Una distribución de tamaños de burbujas es producida por cualquier sistema de sparger. Sin embargo, cuando la rata de alimentación de la slurry excede la velocidad de subida de la burbuja más pequeña, un porcentaje del aire se pierde en el underflow (colas).
- (b) Cuando la rata de gas de la columna se incrementa, la densidad de la zona de colección disminuye. A la vez, la densidad de la zona de espuma se incrementará hasta que las dos sean iguales. En este punto, el gas holdup se incrementará repentinamente desde aproximadamente el 15% a valores superiores al 50%, cuando esto ocurre, se dice que la columna se satura de espuma. La recuperación cae significativamente bajo estas condiciones.
- (c) El incremento en la turbulencia y las burbujas más grandes formadas a altas ratas

del gas causan un incremento en la coalescencia de las burbujas que resulta en una disminución en el incremento del gas holdup. Finalmente, resultará coalescencia severa en la formación de grandes "slugs" de aire. Este efecto cambia las características de mezcla de la columna y reduce tanto el área superficial disponible para la flotación como la recolección de partículas sobre la superficie de la burbuja. Uno de estos factores limitará probablemente la máxima velocidad del gas en la columna a valores entre 1.8 y 3.5 cm/s.

3.5 Nuevos modelos de columnas de flotación

Con el fin de mejorar el desempeño y operación de las columnas de flotación, se han desarrollado otros modelos que involucran modificaciones adicionales al modelo original, ya sea en el cuerpo de la columna, como en el uso de spargers, entre los cuales se destacan:

- a. Modelo de laboratorio de una máquina de flotación en columna vibratoria (figura 5)¹⁹. Los elementos básicos son: Un sensor (Fig. 5-1), un vibrador tipo electrodinámico (Fig. 5-2), cuya potencia es de 40 W y tiene posibilidad de cambiar la amplitud y la frecuencia en un amplio rango; una unidad dispersora de aire (fig. 5-3), para vibraciones horizontales y verticales; un módulo para la creación de burbujas de gas (fig. 5-4), dispositivo alimentador (fig. 5-5), cámara de motor (fig. 5-6).
- b. Modelo de columna de flotación de tres productos - C3P (fig. 6)¹¹, la cual permite una salida de partículas mixtas para su posterior remolienda y retorno al circuito de flotación.
- c. Actualmente se comercializan spargers con las configuraciones que se muestran en las figura 7, 8, 9²⁰.

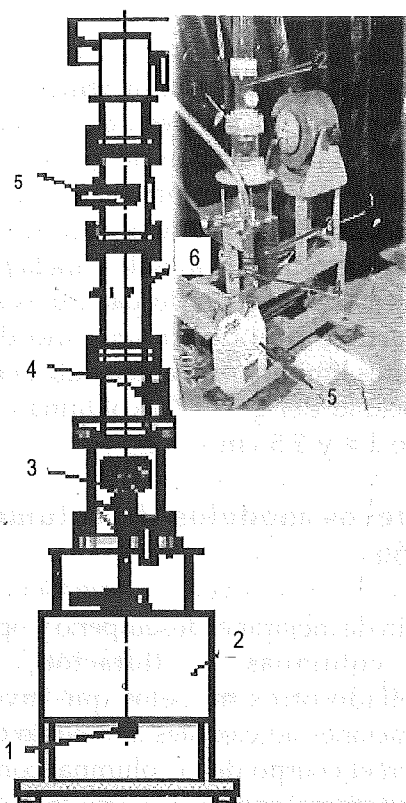


Figura 5. Partes básicas de la columna de flotación vibratoria.

3.6 Conclusiones

- La flotación en columna ha ganado amplia aceptación en la industria del procesamiento de minerales por ser una técnica sólida y económica para producir productos de alta pureza.
- Gracias a la investigación y a las modificaciones en el diseño de equipos, puede mejorarse significativamente la recuperación que ofrece esta técnica.

- La flotación en columna puede usarse con éxito tanto en flotación directa como inversa pues emplea los mismos principios de la flotación espumante.
- La flotación es una técnica que permite automatización total del proceso para controlar las variables importantes como lo son: la profundidad de la espuma, el gas holdup y el bias.

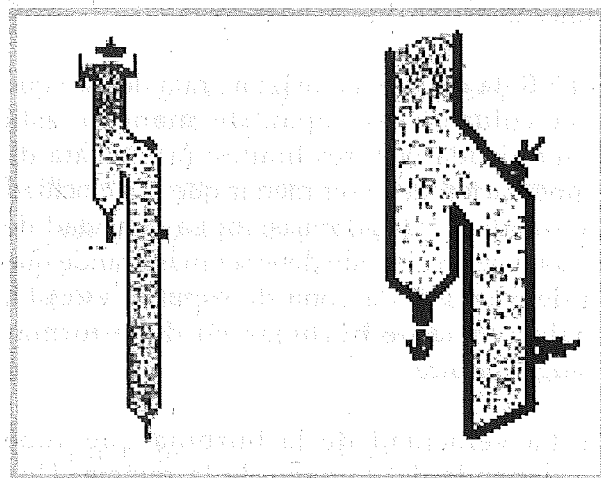


Figura 6. Celda columna de 3 productos.

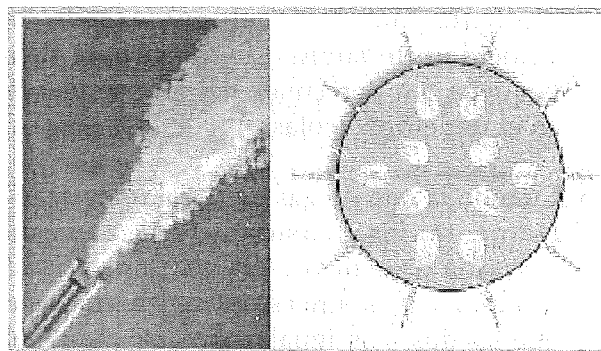


Figura 7. SparJet™ Spargers, de orificio único.



Figura 8. Standard Air /Water Spargers, permite entrada de aire y agua.

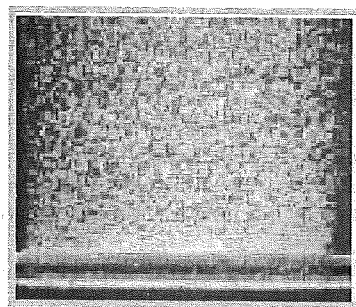


Figura 9. Spargers metálicos porosos.

Referencias bibliográficas

- ¹ Klimpel, R. Introductory Module on "Introduction to solid-solid separation of fine particles by froth flotation". Particle Science & Technology Introductory module. The NSE Engineering Research Center for Particle Science & Technology. University of Florida. 1998.
- ² LASKOWSKI, J. S. And RALSTON, J. Colloid Chemistry in Mineral Processing. Tomado de: Developments in Mineral Processing, 12. Ed. Elsevier. 1992. p. 225.
- ³ Rubio, J., Tessele, F. "Flotación como proceso de remoción de contaminantes: Principios básicos, técnicas y aplicaciones". Revista Minerales, VOL.56 N° 242. Noviembre/Diciembre 2001.
- ⁴ King, R.P. "Principles of flotation". Instituto Sur-Africano de Minas y Metalurgia. Johannesburg. Capítulo 11. 1982.
- ⁵ Kremena D, Metodi M. "Vibratory column flotation machine -vibratory- acoustic and technological researches". Annual of the University of Mining and Geology «St. Ivan Rilski», vol. 44-45, part II, Mining and Mineral Processing, Sofia, 2002, pp. 85-88.
- ⁶ Cruz, E.B. "A Comprehensive Dynamic Model of the Column Flotation Unit Operation", Tesis doctoral en Mining and Minerals Engineering, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, July 31, 1997.
- ⁷ FINCH, J. A, and DOBBY, G. S. "Column Flotation". Pergamon Press. Oxford, 1990.
- ⁸ Castro, S. "Proyecto de cobre a nivel mundial diseñado con celdas en columna como una tecnología convencional". Departamento de Metalurgia. Universidad de Concepción. Chile. En: www.editec.cl/mchilena/agosto2002/Articulo/pionero.htm
- ⁹ UNITED STATES PATENT 5.332.100. "Column flotation method". 1994.
- ¹⁰ TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA A LA INDUSTRIA MINERO-METALÚRGICA. www.shcp.gob.mx/publica/panorama/p196/pl_306d.html
- ¹¹ Ortiz Azañero, A. Et al. "Avances en flotación Columnar" Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas. Vol. 6(11). Enero de 2003. www.scielo.org.pe/pdf/ligeo/v6n11/a10v6n11.pdf
- ¹² Pitta, F. "Influência do equipamento na lotação por espumas". Celula mecanica versus coluna. Centro de Tecnología Mineral/Ministério de Ciência e Tecnología. 2002.
- ¹³ Laskowski, J. S. and Ralston, J. "Colloid Chemistry in Mineral Processing". Tomado de: Developments in Mineral Processing, 12. Ed. Elsevier. 1992. p. 225.
- ¹⁴ M. Bailey, J. Torrealba-Vargas, C. Gomez, J.A. Finch. "Coalescence of bubbles sampled for imaging", Minerals Engineering 18, 2005, Ed. Elsevier, pp. 125-126.
- ¹⁵ Finch, J. and Salas, A. "Column Flotation". McGill University, Montreal, Quebec, Canadá. Copias sueltas.

- ¹⁶ Yianatos, J. Espinosa, R. Finch, J. Laplante, A. Dobby, G. "Effect of column height on flotation column performance". Minerals and metallurgical processing. Febrero de 1988.
- ¹⁷ Canadian Process Technologies Inc. "Column Flotation Cell Operating and Maintenance Manual". Vancouver, B.C. Canada V6P 6G2. Mayo 2002.
- ¹⁸ Chuk, Daniel. Et al. "Identificación del modelo de una columna de flotación de laboratorio". Instituto de Investigaciones Mineras, Fac. de Ingeniería, UNSJ, San Juan, Argentina.
- ¹⁹ Dedelyanova, Kremena. Et al. "Vibratory column flotation machine – vibratory – acoustic and technological researches". Annual of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", vol. 44-45, part II, Mining and Mineral Processing, Sofia, 2002, pp. 85-88.
- ²⁰ Canadian Process Technologies Inc. "Brochure". Vancouver, B.C. Canada V6P 6G2. 2002.